統計数理（1997）
第45巻 第1号 89-105

［原著論文］

遅刻回避行動における時刻ベースの効用関数

統計数理研究所　山　下　智　志

（1996年8月　受付）

1. はじめに

一般に旅行者は交通手段を選択する場合，他の条件が同じならば所要時間の不確実性がより少ない交通手段を選好する傾向がある．この現象に着目し，交通需要予測において所要時間の不確実性の影響が重大であることが，1970年代以降，一部の研究者の間で主張されてきた．しかし，過去の研究成果や実際の需要予測分析を見ると，必ずしも統一的な理論が確立されているわけではなく，それぞれのモデルの推計精度の比較や，モデル間の相互関係について論じられていない．これは従来の研究において，不確実性の定義や，遅刻などリスクの定義が不明瞭であったためである．しかし，不確実性下でのリスクについてはvon Neumann＝MorgensternやArrow, Pratteの研究以来，経済学や意思決定理論において，効用関数の概念を取り入れることにより，明確な定義が可能となっている．

本論文では既存モデルを効用関数の概念を用いて改良し，交通需要予測の分野で発展を見た非集計logit分析を導入することにより，旅行者の不確実性下での行動を分析する手法を開発する．さらに，交通需要予測の推計精度を高めるために，旅行者の効用関数の形状についてより適切なものを見いだすことを目的とする．

なお，本論文で開発したモデルの特長は，従来所要時間ベースで定式化されていた旅行者の効用関数を，出発・到着時刻ベースに変更した点である．これは旅行者は，到着時刻をできるだけ早く，出発時刻をできるだけ遅くしたいという基本的な要望があり，その結果2次的な欲求として所要時間に対して不効用を感じているとみる立場である．このように考えることにより，遅刻等の不効用を合理的に期待効用関数に内包することが可能となり，従来のモデルに比較して現況再現性に優れていることが確認できた．

以下の章の内容については，第2章で不確実性下の意思決定問題と，交通需要予測における不確実性の取り扱われ方について簡単に解説し，それらのモデルを効用関数の観点から比較する．第3章では，本論文で提案するモデルである，時刻ベースの効用関数を用いた交通需要予測方法の骨子を述べ，パラメータの推定方法等，実用にあたっての具体的処理方法および問題点について言及する．第4章では旅行者の効用関数型として適切なものを現実のデータをlogit分析することにより検討する．第5章では結論と今後の課題について簡単に述べる．

2. 従来の研究と目的

2.1 従来の研究

不確実性を伴う意思決定問題を初めて理論的に展開したのはvon Neumann and Morgenstern (1947)においてである．よく知られているように，この論文のメインテーマはプレーヤーの相互関係を考慮した最適戦略の決定であったが，効用の定義に関して基礎的な概念が構築された最初の研究でもある．Arrow (1963) と Pratte (1964) は効用の概念を期待効用と結果効

用（NM効用）に整理した．このことにより，プレーヤーの不確実性に対する態度を結果効用関数の形状で定義することを可能なものとし，リスクに対して回避的であるか，選好的であるかを判別する手段を提供した．なお，効用主体が事象 x に対して感じる効用を $u(x)$ とするとき，$u(x)$ の期待値を「期待効用」と呼ぶ．$u(x)$ については単純に「効用」と呼ぶことが多いが，本論文では期待効用と明確に区別するため，「結果効用」と呼ぶことにした．なお Arrow と Pratte は $u(x)$ を NM 効用関数（von Neumann＝Morgenstern Utility Function）と呼んでいるが，一般に NM 効用と呼ぶ場合は x が富をあらわす場合に限られている．

Markowitz (1952) は Portfolio Selection のなかで，プレーヤーのリスクの低減戦略を確率変数の分散の最小化問題として定式化した．具体的には，平均と分散の線形結合による期待効用関数(M-V 効用関数とよぶ)を想定した．M-V 期待効用関数はその扱いやすさから，リスク回避行動を記述するモデルとして広く利用されている．ただし，プレーヤーの期待効用関数が M-V 効用関数になるためには，Mossin (1968) の指摘した分離定理を満足する必要がある．この定理を満足するには，プレーヤーの結果効用関数が HARA (Hyperbolic Absolute Risk Aversion) 族の効用関数でなければならないが，効用主体(交通行動モデルにおいては旅行者)の効用がこれを満たしている保証がない．これが M-V モデルの利用の限界を示している．

一方，交通需要分析についての研究においては，所要時間の不確実性が交通需要量に影響を与えるとの指摘が1970年代よりあった．Golob (1970) は，所要時間の安定性は交通機関の種類に関わらず重要であり，需要予測モデルにおいては必ず評価しなければならない要因であると主張した．これをうけ，Wong and Sussman (1973) は所要時間変動の要因について研究し，3分類できるとした．それは ① 季節変動，曜日変動等統計的に把握できる要因，② そのときの交通状態に依存して変動する要因(天候，事故)，③ 個別の旅行者が直面する状態の違いにより生ずる変動，である．

Jucker は，交通機関の所要時間の不確実性が機関選択問題に対して如何なる影響を持つかというテーマで，一連の研究を行っている．ただ，これらの研究の焦点は効用関数の形状ではなく，期待効用関数内に定義されたリスク回避係数の分布とその決定要因を，個人属性変数で説明することに重点が置かれていたため，効用関数の形状に対しては深い考察はなされていない．例えば Brastow and Jucker (1977) においては M-V 型の期待効用関数を設定し，旅行者がこの期待効用関数に従い行動していることを確認した．さらに Jackson and Jucker (1982) においては，旅行者の期待効用関数について線形式を与えたが，その要因に分散(M-V モデル)，や標準偏差等のリスクを代表する統計値を挿入し，モデルの推計精度を比較した．その結果，線形期待効用関数において所要時間の分散の項を加えることが効果的であると指摘している．

Hall (1983) は，プリズム行動理論を基礎に，旅行者の遅刻の概念を導入した．彼は，旅行者が所要時間の不確実性によるリスクを避けるため安全余裕時間を設定していることに着目し，旅行者の所要時間に対するコストを，所要時間＋安全余裕時間＝実効旅行時間とみなすべきだと指摘している．そのためこのモデルは，旅行者の遅刻回避型の効用関数を明確に定義したものではなく，線形の期待効用関数を設定していることになる．しかし，安全余裕時間の算出根拠により，旅行者の遅刻回避型の効用関数を設定した場合と同じ結果を得ることが可能となっており注目に値する．

Hall 以後の遅刻に関する研究は，出発時刻・経路選択の同時決定モデルの作成という面から発展をみた．例えば飯田 他 (1991) による，通勤行動における多層 logit モデルによる出発時刻・機関選択モデルがある．このモデルは，本来連続変数であるべき出発時間をカテゴリカル変数として取り扱っている点など，改良されるべき点があるが，行動の決定要因の記述が明確であり，実用性に富む．このモデルにおいて所要時間の不確実性やそれに対する効用の定義は明示的に扱われていないが，旅行者が不確実性に対して出発時刻を早める行動をとるため，結

果的に不確実性に対する回避を考慮した需要予測を行ったと同じ効果がある．さらに内田 他 (1992) においては，通勤ドライバーの出発時刻決定行動の実証分析を行い，非集計 logit モデルの応用問題として取り扱っている．ここで用いられたモデルは，Hall と同様安全余裕時間を含んだ期待効用関数を想定したモデルである．岡田 他 (1990) の研究では通勤交通において出発時間・到着時刻の同時推定を行うことにより時間経過に伴う交通需要予測を試みている．この研究成果は，遅刻確率を基準とした新しい時刻の概念である一般化時刻の概念を通して，リスクに対する旅行者の主観的所要時間分布についての一連の研究につながっている．

旅行者の結果効用関数を明示的に扱った研究としては山下・黒田 (1993) の研究がある．これは交通機関の定時性が求められる空港アクセス交通の需要予測に対して，遅刻回避行動をあらわす結果効用関数を設定した．そして遅刻回避度を個人属性により説明することを試みた．

2.2　効用関数の整理と本研究の目的

前節で，不確実性に対する旅行者行動分析の過去の研究成果を概説したが，この問題に対して効用関数の定義の観点から分類すると図 1 のようになる．

まず，大きく結果効用関数を意識したモデルか否かによって大別できる．結果効用関数を意識せず，期待効用関数を直接定義する方法は，理論的には非線形でも問題はない．しかし，非線形期待効用関数を直接定義できるような合理的な仮定を見いだすことは困難である．このため，期待効用関数を直接定義する方法は，これまでのところ線形期待効用関数に限られている．線形期待効用関数を直接定義するモデルにおいて所要時間の不確実性は，分散や標準偏差といった統計量として期待効用関数中の変数として表現される．前述の Jucker のモデルがこれに相当する．

一方，結果効用関数を意識した分析は，結果効用関数を所要時間 t の関数で定義するか，到着時刻を基準とした時刻 T の関数で定義するかによって分類される．Hall のモデルにおいては，不確実性をあらわす項を線形期待効用関数に挿入した．しかしその項が，不確実性をあらわす統計量を変数とし，遅刻の概念を取り入れたことによって成立する非線形の関数によって計算されるため，ここでは結果効用を定義したモデルとして分類した．

時刻 T に対して効用関数を設定した場合，旅行者は出発時刻を自由に設定できるという条件を考慮する必要がある．そのため，旅行者の出発時刻に対して期待効用最大化の原則を適用す

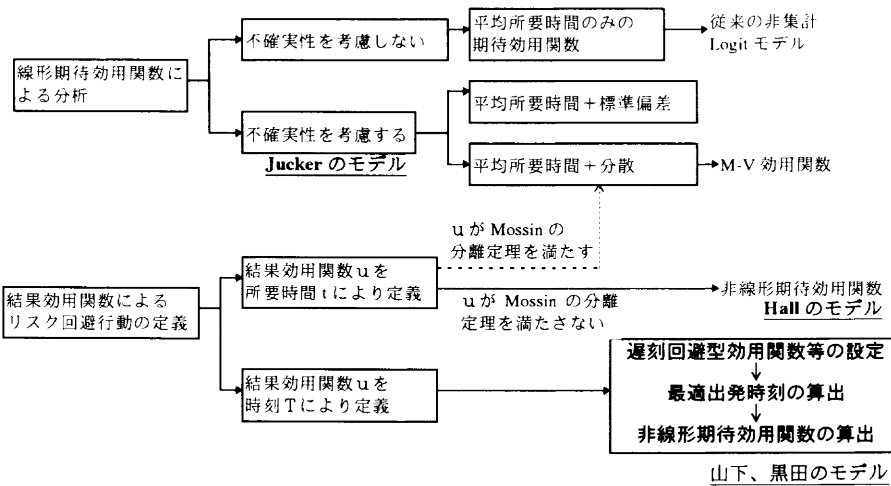

図 1．所要時間不確実性の期待効用関数への組み込み．

ることによって，期待効用を算出する方法が山下・黒田（1996）のモデルである．このモデルによれば，非線形の期待効用関数を合理的に設定することができ，推計精度の向上に寄与することができる．しかし，これまでの研究は以下の2点について十分ではなかった．一つは，結果効用の定義について明確に説明がなかった．とくに，出発時刻に関する効用の定義と所要時間分布についての考察がなかったため，モデルの成立要件が明確ではなかった．もう一つは，結果効用関数を到着時刻に対して，遅刻型と呼ばれる効用関数を仮定していたが，この仮定が妥当かどうかの言及はなされていなかったため，これが旅行者の真の効用関数の形状を表現しているかどうかは不明であった．設定した効用関数が真の関数の形状から乖離している場合，モデルの推計誤差が大きくなり実用に適さない．

本論文では，以下の2点の問題点を解決するべく，出発時刻に対して期待効用最大化の原則を当てはめる方法を具体的に定式化を行い，考察する．とくに，① 結果効用関数を設定するモデルと線形期待効用関数を直接設定するモデルの比較，② 遅刻型の結果効用関数を設定したモデルとその他の結果効用関数を設定したモデルの比較，の以上2点について実証的に分析し，不確実性に対する行動分析に対しての有効性を検討する．

2.3 線形期待効用関数モデルと結果効用関数モデルの比較

前節で紹介した結果効用関数を所要時間の不確実性に適用したモデルを具体的に定式化すると以下のようになる．

交通需要予測において一般的な手法である非集計 logit モデルの期待効用は，所要時間に対する期待効用の項と，費用などのその他の要因を示す項に分解される．具体的には，従来の不確実性を考慮しないモデルにおいては期待効用は以下のような関数を想定していた．

$$V_{ij}=\alpha m_j+A_{ij} \tag{2.1}$$

i：旅行者番号，j：交通手段番号
V_{ij}：非集計モデルの期待効用
m_j：交通手段 j の所要時間の平均
α：m_j に対するパラメータ
A_{ij}：その他の要因の期待効用

ただし，A_{ij} は費用等の共通変数と目的等の個人属性変数によって構成されることが一般的である．

$$A_{ij}=\sum_k \kappa_k Z_{kj}+\sum_k \lambda_k X_{kij} \tag{2.2}$$

Z_{kj}：交通手段 j に対する k 番目の所要時間に関する要因以外の共通変数
X_{kij}：交通手段 j に対する個人 i の k 番目の個人属性変数
κ_k：Z_{kj} に対するパラメータ（限界効用）
λ_k：X_{kij} に対するパラメータ

Jucker が提案した旅行者の期待効用は M-V 型の期待効用関数であり，平均と分散の線形結合で表現されていた．ただし，Jucker は非集計 logit モデルによる，パラメータ推計は行っていない．

$$V_{ij}=\alpha m_j+\beta\sigma_j^2+A_{ij} \tag{2.3}$$

σ_j^2：交通手段 j の所要時間分布の分散
β：σ_j^2 に対するパラメータ

そして，所要時間に対して結果効用関数を設定するモデルにおいては，所要時間に対する期待効用の項は，所要時間 T に対する結果効用関数 $u(T)$ の所要時間分布 $f_j(t)$ による期待値で与えられる．

$$V_{ij}=E[u(T)]+A_{ij} = \int u(t)f_j(t)dt+A_{ij} \quad (2.4)$$

T：所要時間を表す確率変数

$f_j(t)$：交通手段 j の所要時間の確率密度関数：$T\sim f_j(t)$

さて，このアプローチにおいて，$u(t)$ が指数型でかつ $f_j(t)$ が正規分布の場合，Mossin の分離定理を満たし，M-V 期待効用を仮定した場合と同じ選択を行う性質がある． これについては，付録に詳細を解説した．

3. 期待効用関数，結果効用関数，非集計 logit モデル

本章では，前章で紹介した時刻ベースの結果効用関数を用いたモデルについて議論する．

3.1 時刻ベースの結果効用関数

旅行者が交通機関の所要時間を意識する要因について考えてみよう．所要時間が増大することによる旅行者の損失は，① 到着地における可処分時間の減少，② 出発時刻を早めることによる出発地における可処分時間の減少，③ 移動時間増大による疲労，④ 事故等の突発的リスク要因の増大などが考えられる．このうち，①② の要因が旅行者の主たる行動決定要因であるとみなしてモデル化を行う．なお，③④ の損失が旅行時間に対して比例して増大すると仮定するのであれば，本研究で提案したモデルは ③④ の要因を説明することができる．

①② の要因を考え，旅行者の所要時間に関する結果効用関数を，出発時刻ベースの結果効用関数と到着時刻ベースの結果効用関数に分解する．$u_s(T_s)$ を時刻 T_s に出発地を出発する事象の効用，$u_l(T_l)$ を時刻 T_l に到着地に到着する事象の効用とし，時刻 T_s に出発し，時刻 T_l に到着したときの効用 $u_{sl}(T_s, T_l)$ を以下のように定義する．

$$u_{sl}(T_s, T_l)=u_s(T_s)+u_l(T_l) = u_s(T_s)+u_l(T_s+T) \quad (3.1)$$

なお，所要時間を T とし，$T_l=T_s+T$ である．T_s は旅行者が任意に選択できる変数であるが，T は確率変数であるため T_l も確率変数である．

交通機関の所要時間が不確実なとき，期待効用は上式の期待値で表され，よって交通手段 j および出発時刻 T_s を選択したときの期待効用 $u^e(T_s, j)$ は以下のように表される．ただし $f(T_l|T_s, j)$ は旅行者が出発時刻 T_s，交通手段 j を選択したときの到着時刻の確率密度関数である．

$$u^e(T_s, j)=E[u_{sl}(T_s, T_l)]=\int u_{sl}(T_s, T_l)f(T_l|T_s, j)dT_l \quad (3.2)$$

旅行者は出発時刻 T_s を任意に選択できる．旅行者が期待効用を最大化すべく出発時刻を選択しているとすれば，機関別所要時間分布に対する期待効用関数 u_j^{e*} は，

$$u_j^{e*}=u^e(T_j^*, j) \quad (3.3)$$

となる．ここで T_j^* は期待効用 $u^e(T_s, j)$ を最大化する出発時刻であり，以下の必要条件を満足する．

$$u^e(T_j^*, j) = \max_{T_s} u^e(T_s, j) \tag{3.4}$$

この結果，非集計 logit モデルに導入すべき期待確定効用は

$$V_{ij} = u_j^{e*} + A_{ij}. \tag{3.5}$$

その結果，需要予測に必要なパラメータは

I. 出発時刻ベースの結果効用関数 $u_s(T_s)$ を構成するパラメータ
II. 到着時刻ベースの結果効用関数 $u_l(T_l)$ を構成するパラメータ
III. 到着時刻分布 $f(T_l \mid T_s, j)$ を構成するパラメータ
IV. 時間以外の要因 A_{ij} に関するパラメータ κ, λ

であり，これらのパラメータを logit モデルで推定する．ただし一般的に $u^e(T_j^*, j) = \max_{T_s} u^e(T_s, j)$ は解析的に求解できないので，II，IIIの設定を工夫するか，数値的解法が必要である．

3.2 非集計モデルによるパラメータの推定

本研究では，前節で定義した $u_s(T_s), u(T_l), f(T_l \mid T_s, j), \kappa, \lambda$ を推計するために，非集計 logit モデルを用いる．本節では logit モデルによるパラメータ推計について簡単に説明する．非集計 logit モデルが，いつ初めて選択モデルに用いられたかについては，現在定説はない．しかし交通需要予測に対して，理論的な側面を構築したのは MacFadden (1974) である．

旅行者 i の交通機関 j に対する期待効用を U_{ij} とし，V_{ij} と個人間の誤差項 ε_{ij} に分解する．Z_{kj}, X_{kij} は所要時間以外の要因（料金など）である．前節で示したモデルの場合(3.5)式より，

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} = u_j^{e*} + A_{ij} + \varepsilon_{ij}. \tag{3.6}$$

ここで，期待効用の最大化を仮定する．つまり，旅行者 i が選択肢集合 J の中から選択肢 j を選択する必要十分条件は以下のようになる．

$$U_{ij} > U_{ij'}, \qquad j \neq j', \qquad j, j' \in J \tag{3.7}$$

よって，旅行者 i が選択肢 j を選択する確率は，$P_{ij} = Pr(U_{ij} > U_{ij'},\ j \neq j',\ j, j' \in J)$ であり，ここで ε_{ij} が Gumbel 分布に従うと仮定すると，各交通機関の選択確率は以下のようになる．

$$P_{ij} = \frac{\exp(V_{ij})}{\sum_{j' \in J_i} \exp(V_{ij'}) + \exp(V_{ij})} \tag{3.8}$$

このとき尤度関数は

$$L = \prod_{i \in N} \prod_{j \in J} P_{ij}^{\delta_{ij}} \tag{3.9}$$

となる．ただし，δ_{ij}：個人 i が交通機関 j を選択していれば 1，選択していなければ 0 の離散変数．N：データ集合，である．以上の最尤法により $u_s(T_s), u_l(T_l)$ および所要時間以外の要因のパラメータ κ_k, λ_k を推計することができる．

3.3 時刻ベースの結果効用関数モデルの問題点

以上の需要予測にいたるアプローチで，問題になる点についてまとめる．

3.3.1 効用関数についての問題点

非集計 logit によるパラメータ推計を行うには，$u_s(T_s), u_l(T_l)$ の関数型を特定する必要があ

る．$u_s(T_s)$ は出発地の属性に依存し，$u_l(T_l)$ は目的地の属性に依存する．そのため，出発地及び目的地の属性が多様になるトリップについては，モデルの推計誤差が大きくなると予想される(たとえば観光トリップ)．モデル精度を維持するためには，旅行者にとって出発地や目的地の属性がある程度限定できる対象がよい．たとえば，空港アクセストリップは目的地の属性が均質で，$u_l(T_l)$ の特定化を行いやすいため，本モデルの適用が可能である．

3.3.2 主観分布についての問題点

期待効用関数を求める際，旅行者の所要時間に対する分布形状を知る必要がある．しかし旅行者の主観分布は，経験，情報提供などに大きく依存すると考えられる．モデル推計ではこれらの要因は最終的には ε_{ij} に集約されモデルの推計誤差として把握される．そのため，精度をあまり追求しないのであれば，経験依存性などの要因を除外し，合理的期待仮説により，所要時間分布を実旅行時間分布で置き換える方法も考えられる．しかし，旅行者の主観分布は，経験が十分ではないときに実旅行時間分布より分散が大きい傾向があると考えられ，その結果，実旅行時間分布による代用は，単に誤差の拡大にとどまらず，内生パラメータを歪めてしまう可能性がある．

3.3.3 期待効用関数の求め方についての問題点

結果効用関数を利用したモデルは，旅行者が期待効用最大化の原則に基づいて行動しているという仮定によっている．この仮定は，非集計 logit モデルの成立条件でもあり，logit モデルを提供する限り問題とはなり得ない．しかし，T_{sj}^* を $u^e(T_s, j)$ の最大化により求めるには，全域にわたって T_s が選択可能である必要があるが，必ずしも旅行者のおかれた立場はこのようなものではない．ただし，このような選択肢に対する制約が，モデルの推計精度を低下させるという問題は，本モデル以外のすべてのモデルに共通した問題点である．

4. 旅行者の主観所要時間分布と到着時刻結果効用関数

前節で紹介した分析を行う際，結果効用関数型を事前に決定しなければならない．従来山下・黒田 (1996) 等，所要時間の不確実性を議論する際には遅刻型の効用関数が用いられてきたが，この前提が適当かどうかを本章および次章で検証する．本章では，遅刻型の効用関数以外の候補となる効用関数型や，仮定する分布型などを紹介し，それぞれを組み合わせたときの期待効用関数を求める．

4.1 解析対象の主観所要時間分布

交通機関の所要時間分布については，機関，ルート等の特性が大きい．本来ならば選択肢ごとの所要時間分布を仮定するべきであるが，計算能力およびデータの制約より本論文では以下の分布を想定した分析を行う．I 分布しない（定時性が確保されている)，II 正規分布．

4.2 解析対象の結果効用関数

4.2.1 出発時刻の効用関数

出発時刻に対して旅行者の効用の要因となるのは，出発地における可処分時間の減少である．そのため，出発時刻に対する効用は，限界効用（＝時間価値）の積分によって表現できる．そこで本論文では，この効用を旅行時間における機会損失によって定義した．つまり，$u_s(T_s)=-\int_{T_s}^{T_d} w_s(T)dT$，ただし $w_s(T)$ は出発地における時刻 T の時間価値である．一般的にいって，時間価値 $w_s(T)$ は時刻 T の関数となるが，その要因はきわめて複雑かつ個別的であり，これを探究することは本研究の範囲を超えているものと思われる．そこで，本研究では出発地における旅行者の時間価値は，時刻に対して一定であると仮定する ($w_s(T)=a$)．これにより出発時刻

の効用関数は，時刻に対して線形であると仮定される．

$$u_s(T_s)=a(T_d-T_s) \tag{4.1}$$

前章で取り上げた旅行者の所要時間増大に対する不効用要因のうち，③移動時間増大による疲労，④事故等の突発的リスク要因については，不効用が所要時間に比例して増大するならば，a のパラメータを増大するだけで要因をモデルに取り込んだことになる．これは，所要時間に対する限界不効用を b とおき，式(3.1)に挿入した $u_{sl}(T_s, T_l)=u_s(T_s)+u_l(T_l)-bt$ について式(3.1)から式(3.5)と同様の処理をすることにより導かれる．また,「所要時間の平均の増大」=「出発時刻の早発化」であることを考えると，この結論は，感覚的にも理解できる．

4.2.2 到着時刻の効用関数

出発時刻の場合と同じように，到着時刻の効用関数も到着地における時間価値によって表される．帰宅トリップをのぞく一般の交通現象は到着地において時刻に関する制約をもっている．このことは到着地における時間価値は時刻に対して一定ではないことを示している．本論文では到着時刻の効用関数型について複数の仮定をおき，それらの有意性について検討する．今回候補となる効用関数は（イ）遅刻型，（ロ）制約時刻帯型，（ハ）logistic 型である（図2）．

（イ） 遅刻型効用関数

$$u_l(T_l)=\begin{cases} 0 & T_l< T_d \\ r & T_l\geq T_d \end{cases} \tag{4.2}$$

（ロ） 制約時刻帯型効用関数

$$u_l(T_l)=\begin{cases} 0 & T_l< T_{d1} \\ r\dfrac{T_{d2}-T_l}{T_{d2}-T_{d1}} & T_{d1}\leq T_l< T_{d2} \\ r & T_l\geq T_{d2} \end{cases} \tag{4.3}$$

（ハ） logistic 型効用関数

$$u_l(T_l)=\frac{r}{1+e^{-(T_l-T_d)/c}} \tag{4.4}$$

ただし，通常 r は負値をとる．この結果，4.1節で提案した分布型の候補を考慮すると，合計6通りのモデルを提案したことになる（表1）．次節以降ではこれらのモデルの期待効用関数を導出し，非集計 logit モデルの確定項の計算方法を検討する．

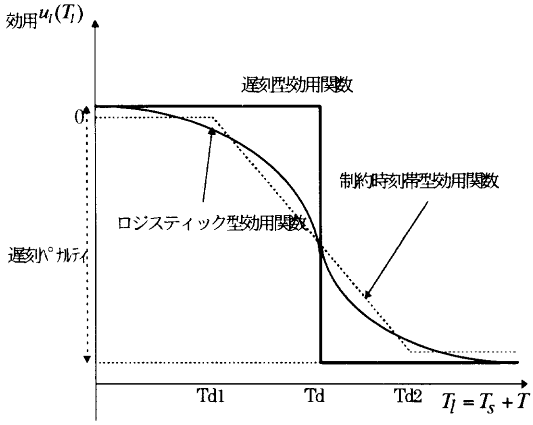

図2． 候補となる到着時刻に関する結果効用関数の形状．

表1．分析対象の組み合わせ．

到着時刻に対する結果効用関数	主観的所要時間分布 I 定数(不確実性なし)	II 正規分布
イ　遅刻型	I－イ	II－イ
ロ　制約時刻帰着型	I－ロ	II－ロ
ハ　Logistic型	I－ハ	II－ハ

4.3　不確実性が無いときの期待効用関数

本論文での主要な議論は，旅行者の不確実性に対する行動原理を計量化することにある．その手段として時刻ベースの到着時刻結果効用関数を設定した．この節ではこの効用関数を採用しつつも所要時間の確実性が確保されている状況における期待効用関数の形状について解説する．

4.2.1 節で仮定したように，旅行者の出発地における時間価値が，時刻に対して独立であるとするとき，到着時刻に関する結果効用関数の形状に関わらず，所要時間の分散が 0 であるという仮定は，所要時間に対して線形期待効用関数を設定することと同値になる．これは以下の展開によって明らかである．

$u_{sl}(T_s, T_l)$ は出発時刻に関する結果効用関数 $u_s(T_s)$ と，到着時刻に関する結果効用関数 $u_l(T_l)$ により以下のように定義される．

(4.5) $$u_{sl}(T_s, T_l)=u_s(T_s)+u_l(T_l)$$

(4.6) $$u_s(T_s)=a(T_d-T_s)$$

また，到着時刻の定義と旅行時間の分散が 0 より

(4.7) $$T_l=m_j+T_s$$

よって，旅行者の期待効用関数は分散が 0 のとき，以下のようになる．

(4.8) $$u^e(T_s, j)=a(T_d-T_s)+u_l(m_j+T_s)$$

期待効用最大化の原則に従い，最適出発時刻を求める．

(4.9) $$\frac{\partial}{\partial T_s}u^e(T_s, j)=-a+u_l'(m_j+T_s)=0$$

(4.10) $$T_j^*=-m_j+u_l'^{(-1)}(a)$$

ただし，$u_l'^{(-1)}$ は u_l' の逆像である．$u_l(T_l)$ の関数型によっては，$u'^{(-1)}(a)$ は 1 点とはならず，2 点集合になる．このとき最適出発時刻として経済的意味をもつのは，2 点のうち小さい点である（もう一方の点は行動限界時刻――それ以上遅くなると出発しない時刻――を与える）．

よって，旅行者の最大期待効用は以下のようになる．

(4.11) $$u_j^{e*}=am_j-au_l'^{(-1)}(a)+u_l(u_l'^{(-1)}(a))+aT_d$$

第 2 項～第 4 項は選択肢 j に対して定数であり，非集計 logit モデルにおいては，無視しうる項である．その結果，旅行者の期待効用は，到着時刻の効用関数の形状に関わらず，平均所要時間に対して線形となる．

4.4 正規分布と遅刻型結果効用関数の場合

旅行者の交通機関 j に対する知覚所要時間分布 $f(t)$ が正規分布 $N(m_j, \sigma_j^2)$ であるとすると，所要時間に関する期待効用 $u^e(T_s, j)$ は

$$
(4.12)\qquad \begin{aligned} u^e(T_s, j) &= a(T_d - T_s) + \int u_l(T_s + T) f(t)\,dt \\ &= a(T_d - T_s) + \frac{r}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_j}\int_{T_d - T_s}^{\infty} \exp\left(\frac{(m_j - T)^2}{2\sigma_j^2}\right) dt \end{aligned}
$$

である．よって最適出発時刻は

$$
(4.13)\qquad T_j^* = T_d - m_j - \sigma_j \sqrt{2\ln\left(\frac{r}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_j}\right)}.
$$

よって期待効用関数は $\Phi(t)$ を標準正規分布の分布関数とすると，以下のようになる．

$$
(4.14)\qquad u_j^{e*} = am_j + a\sigma_j \sqrt{2\ln\left(\frac{r}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_j}\right)} + r\Phi\left(\ln\left(\frac{r}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_j}\right)\right)
$$

4.5 正規分布と制約時刻帯型・logistic 型損失関数の場合

知覚所要時間分布に正規分布を用いた場合，遅刻型効用関数については最適出発時刻と期待効用関数を解析的に求めることができるが，制約時刻型や logistic 型の効用関数については解析的に求めることができない．そのため logit モデルにおける尤度最大化の際，推計パラメータが変更されるたびに，各交通機関について効用最大化問題を数値的に解かねばならない．このため最大化のループが 2 重になるため計算時間は飛躍的に増大する．具体的には以下のフローによる．

Step. 1 logit モデルの初期パラメータを決定する．

Step. 2 交通機関 j について出発時刻 T_{sj} を適当に与える（T_{sj} の初期値）．

Step. 3 ニュートン法により，T_{sj} を変数として $u_{sl}(T_s, T_l)$ について最大化を行い，その値を u_j^{e*} とする．

Step. 4 Step. 2〜Step. 3 の処理をすべての交通機関 j について計算する．

Step. 5 ゾーンが複数存在するときはすべてのゾーンについて Step. 2〜Step. 4 を計算する．

Step. 6 u_j^{e*} を用い，すべての個人 i について選択確率 P_{ij} を求め，logit モデルの対数尤度 $\ln L$ を計算する．

Step. 7 logit モデルのパラメータを変数とみなし，Step. 2〜Step. 5 で求めた対数尤度 $\ln L$ を最大化する．

本研究では，可変計量法（BFGS）を用いて最大化している．

5. 事 例 研 究

到着時刻ベースの効用関数の交通選択行動に対する説明力を，アンケートデータを用い実証的に調べる．用いた事例は 2 例である．一つは交通機関の選択問題として空港アクセス交通を扱った．空港アクセス交通は遅刻の定義が明確であり，旅行者の所要時間の安定性に対する要求が鮮明である．今一つは経路選択問題の例として，通勤交通における自動車交通を扱った．経路による特色が鮮明な高速道路と一般道路の選択を対象にした．

5.1 空港アクセス交通

5.1.1 データおよびモデル

空港アクセスデータについて検討する．用いたデータは，1992 年 11 月 11 日に大阪空港においてアンケート調査によって得たものである．利用交通機関は，$J=\{$鉄道, バス, タクシー$\}$ とし，51 ゾーンから発生した ($n=676$) トリップに対してモデル化を行っている．データ収集方法については山下・黒田 (1993)，黒田 他 (1993)，各交通機関の所要時間分布の算出方法は参考文献山下 (1995) を参照．

logit モデルに用いた期待効用 V_{ij} は以下の関数で与えられる．

$$V_{ij}=u_j^{e*}+\kappa_C Z_C(j)+\kappa_{0B}Z_{0B}(j)+\kappa_{0T}Z_{0T}(j)+\lambda_{1B}X_{1B}(i,j) \\ +\lambda_{1T}X_{1T}(i,j)+\lambda_{2B}X_{2B}(i,j)+\lambda_{2T}X_{2T}(i,j) \tag{5.1}$$

u_j^{e*} は，前章までに解説した所要時間に関する期待効用であり，到着時刻に対する効用関数 $u_l(T_l)$ を構成するパラメータおよび各交通機関の知覚所要時間分布に関する統計量 m_j, σ_j によって与えられる関数である．本研究では前章で説明したとおり $u_l(T_l)$ が 3 通りと知覚所要時間分布が 2 通りの組み合わせによる期待効用関数をあてはめたが，比較のため Jucker の線形効用関数 $u_j^{e*}=\alpha m_j+\beta\sigma_j^2$ による推計も行う．

$Z_C(j)$ は費用(円)であり，各出発ゾーンから空港までの各交通機関の料金である．$Z_{0B}(j)$, $Z_{0T}(j)$ は交通機関に対するダミー変数であり，以下のように定義される．

$$\begin{cases} Z_{0B}(j)=1: j=\text{バス} \\ Z_{0B}(j)=0: j\neq\text{バス}, \end{cases} \qquad \begin{cases} Z_{0T}(j)=1: j=\text{タクシー} \\ Z_{0T}(j)=0: j\neq\text{タクシー} \end{cases} \tag{5.2}$$

これらの変数は，交通手段特有の効用を与えることになる．快適性や安全性などが考えられる．$X_{1B}(i,j)$, $X_{1T}(i,j)$ は交通機関と旅行目的のクロスダミー変数であり，旅行者の i の職業を A_i (ただし，$\{A_i\}=\{$業務, 非業務$\}$) とし，以下のように定義される．

$$\begin{cases} X_{1B}(i,j)=1: A_i=\text{業務 and} \\ \quad j=\text{バス} \\ X_{1B}(i,j)=0: A_i\neq\text{業務 or} \\ \quad j\neq\text{バス}, \end{cases} \qquad \begin{cases} X_{1T}(i,j)=1: A_i=\text{業務 and} \\ \quad j=\text{タクシー} \\ X_{1T}(i,j)=0: A_i\neq\text{業務 or} \\ \quad j\neq\text{タクシー} \end{cases} \tag{5.3}$$

$Z_{2B}(i,j)$, $Z_{2T}(i,j)$ は交通機関と旅行者の職業に対するクロスダミー変数であり，旅行者の i の職業を O_i (ただし，$\{O_i\}=\{$有職者, 主婦・学生・年金受給者$\}$) とし，以下のように定義される．

$$\begin{cases} X_{2B}(i,j)=1: O_i=\text{有職者 and} \\ \quad j=\text{バス} \\ X_{2B}(i,j)=0: O_i\neq\text{有職者 or} \\ \quad j\neq\text{バス}, \end{cases} \qquad \begin{cases} X_{2T}(i,j)=1: O_i=\text{有職者 and} \\ \quad j=\text{タクシー} \\ X_{2T}(i,j)=0: O_i\neq\text{有職者 or} \\ \quad j\neq\text{タクシー} \end{cases} \tag{5.4}$$

κ はそれぞれの変数に対するパラメータである．以上の変数 X について AIC により変数選択を行い，最もよいモデルを調べた．なお，その他の個人要因については，年齢，性別，往路 or 帰路，目的地の属性を調べたが，予測結果に対して有為な影響を持たなかった．

5.1.2 計算結果について

計算結果については表 2，表 3 に示した．表 2 を見ると最も AIC が良好であったモデルは，logistic 型の効用関数と正規分布の組み合わせであった．

なお，線形期待効用関数による予測については，不確実性を考えない場合（I 定数）に比較して精度が向上している．これは Jucker の指摘した結論である．しかし，時刻ベースの効用関

表2. 各仮定に基づく最適モデルの精度の評価（空港アクセスデータ）.

到着時刻 結果効用関数	所要時間分布 定数 I	所要時間分布 正規分布 II
遅刻	a 1136.76	c 1137.27
(イ)	0.241	0.243
制約時刻帯	a 1136.76	c 1133.65
(ロ)	0.241	0.244
Logistic	a 1136.76	c 1131.16
(ハ)	0.241	0.248

線形期待効用関数	a 1137.11
(標準偏差)	0.242

上段：AIC　　下段：自由度調整済尤度比
b:選択された時間以外の変数は、いずれのモデルも費用、ダミー、利用目的ダミーであった。
自由度調整済尤度比:MacFaddenの尤度比に自由度調整を行った。

表3. Logistic 型結果効用関数に関するパラメータ推計（知覚所要時間：正規分布）.

II-(ハ)			データ数	764
		初期対数尤度		-839.34
	MODEL-A	MODEL-B	MODEL-C	MODEL-D
最大対数尤度	-560.48	-558.00	**-557.58**	-557.11
パラメータ数	6	8	**8**	10
AIC	*1132.95*	*1132.01*	***1131.16***	*1134.22*
自由度調整済尤度比	0.245	0.248	**0.248**	0.248
平均所要時間	-0.024	-0.029	**-0.022**	-0.022
遅刻ペナルティ	-2.684	-5.135	**-5.890**	-5.202
logisticのC値	-2.019	-2.517	**-2.372**	-2.635
費用	-0.038	-0.038	**-0.035**	-0.035
鉄道ダミー	-1.430	-1.307	**-1.035**	-1.015
バスダミー	-2.093	-2.180	**-2.325**	-2.129
業務堺線ダミー		0.483		0.074
業務湾岸線ダミー		0.338		0.253
有職者堺線ダミー			**-0.316**	-0.280
有職者湾岸線ダミー			**0.274**	-0.043
遅刻の時間価値(分)	111.83	177.07	**267.73**	236.46

数を設定したモデル（II 正規分布）に比較すると推計精度はよくない．これから，旅行者の効用関数の表現方法としては，線形期待効用関数は適していないことがわかる．$u_l(T_l)$ として適切な関数は何かという問題であるが，推定結果から見ると，logistic 型の結果効用が優れており，従来の研究で用いてきた遅刻型の効用関数をしのぐ結果となった．表3に，logistic 型効用関数と正規分布の組み合わせのモデルにおいて，選択された変数とそのパラメータを示した．遅刻の時間価値（遅刻ペナルティ/平均時間のパラメータ）や，時間価値（平均時間のパラメータ/費用のパラメータ）の値も常識的な結果である．

5.2 計算結果（2）高速道路を含む経路選択問題

前節で，交通機関選択問題について，logistic 型の結果効用関数は Jucker の線形期待効用関数や遅刻型の結果効用関数をしのぐという結果が得られた．本節では，経路選択問題についても同様の結果が得られるかどうかを検討する．取り上げた問題は，高速道路を選択肢に含む通勤自動車交通の経路選択問題である．

5.2.1 データについて

本節の解析に使用したデータは，阪神高速道路公団（1993）による，「道路交通情報が経路選択行動に与える影響に関する業務調査」において収集されたパネル調査データの，第1回目データを使用している．調査地点は大阪府堺市楠の葉交差点であり，ここを通り大阪市内へ通勤する自動車を調査対象とした．ただし，データ量や選択経路の組み合わせ等の観点から，目的地が大阪市内の主要11区であるものに限定した．結果効用関数のパラメータ推計に利用したデータ数は765である．旅行者の選択肢は，国道26号線，阪神高速堺線，阪神高速湾岸線の3つである．

logit モデルに用いた期待効用 V_{ij} は以下の関数で与えられる．

$$V_{ij} = u_j^{e*} + \kappa_C Z_C(j) + \kappa_{0S} Z_{0S}(j) + \kappa_{0W} Z_{0W}(j) + \lambda_{1S} X_{1S}(i, j) + \lambda_{1W} X_{1W}(i, j) + \lambda_{2S} X_{2S}(i, j) + \lambda_{2W} X_{2W}(i, j) \tag{5.5}$$

$Z_C(j)$ は費用（円）である．国道26号線は無料，高速堺線，高速湾岸線は500円である．$Z_{0S}(j)$, $Z_{0W}(j)$ は選択経路に対するダミー変数であり，以下のように定義する．

(5.6)
$$\begin{cases} Z_{0S}(j)=1 : j=\text{高速堺線} \\ Z_{0S}(j)=0 : j\neq\text{高速堺線}, \end{cases} \qquad \begin{cases} Z_{0W}(j)=1 : j=\text{高速湾岸線} \\ Z_{0W}(j)=0 : j\neq\text{高速湾岸線} \end{cases}$$

$Z_{1S}(i,j), Z_{1W}(i,j)$ は選択経路と旅行目的のクロスダミー変数であり，以下のように定義される．

(5.7)
$$\begin{cases} X_{1S}(i,j)=1 : A_i=\text{業務 and} \\ \quad j=\text{高速堺線} \\ X_{1S}(i,j)=0 : A_i\neq\text{業務 or} \\ \quad j\neq\text{高速堺線}, \end{cases} \qquad \begin{cases} X_{1W}(i,j)=1 : A_i=\text{業務 and} \\ \quad j=\text{高速湾岸線} \\ X_{1W}(i,j)=0 : A_i\neq\text{業務 or} \\ \quad j\neq\text{高速湾岸線} \end{cases}$$

$Z_{2S}(i,j), Z_{2W}(i,j)$ は交通機関と旅行者の職業に対するクロスダミー変数であり，以下のように定義される．

(5.8)
$$\begin{cases} X_{2S}(i,j)=1 : O_i=\text{有職者 and} \\ \quad j=\text{高速堺線} \\ X_{2S}(i,j)=0 : O_i\neq\text{有職者 or} \\ \quad j\neq\text{高速堺線}, \end{cases} \qquad \begin{cases} X_{2W}(i,j)=1 : O_i=\text{有職者 and} \\ \quad j=\text{高速湾岸線} \\ X_{2W}(i,j)=0 : O_i\neq\text{有職者 or} \\ \quad j\neq\text{高速湾岸線} \end{cases}$$

である．κ, λ はそれぞれの変数に対するパラメータ．

5.2.2 計算結果について

表 4 に計算結果を示した．この計算結果で特筆すべきことは，知覚所要時間分布に定数を仮定した（不確実性を考慮しない）モデルは線形期待効用モデルと比較すると，推計精度がよい．これは，Jucker の指摘に反し，所要時間の不確実性（標準偏差）は需要予測に貢献していないことを表している．しかし，logistic 型結果損失関数と正規分布の組み合わせを用いたモデルの AIC を見ると，不確実性を考慮しないモデルに比較して，推計精度の向上が達成されている．これは，線形期待効用で不確実性の項（所要時間の分散値）が必要でないという結論がでるようなケースでも，必ずしも不確実性を除外した分析が正しいとは限らないことを示している．

また，この分析で logistic 型結果効用関数が遅刻型結果効用関数に比較して精度がよくなっ

表 4．各仮定に基づく最適モデルの精度の比較（高速道路を含む経路選択データ）．

到着時刻 結果効用関数	所要時間分布 定数　I	 正規分布　II
遅刻 (イ)	b　1183.57 0.212	b　1172.27 0.220
制約時刻帯 (ロ)	b　1183.57 0.212	b　1183.57 0.214
Logistic (ハ)	b　1183.57 0.212	b　1170.54 0.222

線形期待効用関数 (標準偏差)	b　1182.59 0.213

上段：AIC　　下段：自由度調整済尤度比
選択された時間以外の変数は以下のとおり
a:費用、ダミー
c:費用、ダミー、職業ダミー
自由度調整済尤度比:MacFaddenの尤度比に自由度調整を行った。

表 5．Logistic 型結果効用関数に関するパラメータ推計（知覚所要時間：正規分布）．

II-(ハ)			データ数	676
		初期対数尤度		-744.86
	MODEL-A	MODEL-B	MODEL-C	MODEL-D
最大対数尤度	-583.12	**-577.27**	-582.36	-577.13
ﾊﾟﾗﾒｰﾀ数	6	**8**	8	10
AIC	*1178.23*	***1170.54***	*1180.72*	*1174.25*
自由度調整済尤度比	0.215	**0.222**	0.216	0.222
平均所要時間	-0.057	**-0.059**	-0.057	-0.059
遅刻ペナルティ	-2.068	**-2.008**	-2.043	-2.011
logisticのC値	-2.750	**-1.670**	-2.260	-1.710
費用(100円)	-0.029	**-0.029**	-0.029	-0.029
鉄道ダミー	-0.245	**0.413**	-0.226	0.330
バスダミー	1.321	**2.007**	1.588	1.939
業務鉄道ダミー		**-0.754**		-0.834
業務バスﾀﾞﾐｰ		**-0.847**		-0.914
有職者鉄道ﾀﾞﾐｰ			-0.257	1.768
有職者バスﾀﾞﾐｰ			-0.328	1.492
遅刻の時間価値(分)	36.28	**34.03**	35.84	34.08

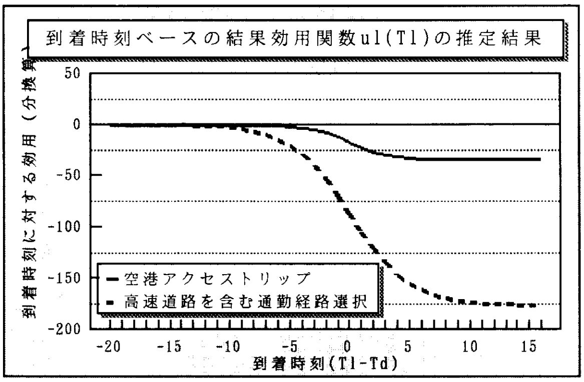

図3. 推計された logistic 効用関数.

た点については，旅行者にとって到着制約時刻の概念が曖昧であり，「何時頃に到着することが望ましい」といった到着目標時刻をもとに行動しているためと思われる. logistic 型効用関数による精度の向上はこのような旅行者の心理構造をより正確に反映したためと思われる.

図3に推計された logistic 型結果効用関数を示した. これを見ると，遅刻のペナルティは空港アクセス交通において大きく，通勤交通の経路選択問題について小さい. また，空港アクセス交通は効用の変化が短時間で終わるのに対し，通勤交通は効用の変化が約20分間続く.

空港アクセスは定時性を要求されるトリップであるといわれているが，国内航空路線においては便数が多く，特にアンケートの回答数が多かった大阪→東京便では1時間毎に便が設定されている. これが空港アクセス交通の遅刻ペナルティが小さくなった原因であると思われる. また，空港トリップはトリップ目的が業務以外のデータが含まれていることや，空港において買い物等の時間を消費する旅行者の存在などが影響していることも考えられる.

6. 結論と今後の課題

以上の分析により，以下のように結論をまとめる.

① 本研究は，旅行者の不確実性に対する効用の表現方法を検討することにあった. 過去の研究を整理すると効用関数の形態が，期待効用関数を直接設定するか，結果効用関数を設定するかという2つの立場がある. さらに，結果効用関数を設定する立場も，結果効用関数の変数を所要時間ベースにするか時刻（到着制約時刻からの時間差）にするかの2つの表現方法が可能である. 時刻ベースの結果効用関数を用いた需要予測は，線形期待効用関数に比較して概して推計精度が高い. これは時刻ベースの結果効用関数が旅行者の効用をより的確に表現しているからと思われる.

② 時刻ベースの効用関数の形状は，単純な遅刻回避型の効用関数でも線形効用関数に比較して，推計精度の向上が得られる. しかし，logistic 曲線などのその他の結果効用関数を用いることにより，さらに推計精度の向上をはかれる可能性が確認できた. ただし，logistic 結果効用関数を用いる場合，適切な分布を想定しなければ，期待効用を求める計算が膨大となり，実用には適さない.

以上の結論をふまえ今後の課題としては以下の点があげられる.

知覚所要時間分布について，実データの分布を用いた. これは旅行者の知覚が合理的期待形成仮説に基づいていると仮定したためである. しかし，実際の知覚分布は旅行者個人の過去の

経験に依存するため，この仮定は成立しない可能性が高い．そこで旅行者の知覚分布について，より精密な議論をするために，特に主観的所要時間の経験依存性について詳しく検討する必要がある．

謝　　辞

本研究の過程で貴重なコメントをいただいた神戸大学黒田勝彦氏，東北大学内田毅氏，および表記方法等について重要な御指摘をいただいたレフェリーの方々，統計数理研究所の内田雅之氏に深く感謝の意を表します．

付　　録

Jucker が提案した M-V 型の期待効用最適化問題が成立する旅行者の結果効用関数について検討する．ただし，旅行者にとって所要時間の増大は効用の減少となる．以下では負値での議論をさけるため，効用関数はコスト関数として定義する．そのため $u(T)$ の増加はコストの増加，効用の減少となっていることに注意したい．

$$u(T)=1+\exp(T/r)$$

となる結果効用関数が与えられたとすると，

$$\begin{aligned} u^e &= E[u(T)] \\ &= E[1+\exp(T/r)]. \end{aligned}$$

T の分布を正規分布とすると，

$$=1+\exp\left\{\frac{1}{r}E(T)+\frac{1}{2r^2}\mathrm{Var}(T)\right\}.$$

ここで，$\tau=E(T)+(1/2r)\mathrm{Var}(T)$ とすれば，

$$\begin{aligned} E[u(T)] &= 1+\exp(\tau/r) \\ &= u(\tau). \end{aligned}$$

この式は，所要時間の不確実性を伴う交通機関の期待効用 $E[u(T)]$ が，不確実性を伴わない所要時間 τ の交通機関の効用に置き換えられることを表現している．この意味で τ は不確実な所要時間 T に対する旅行者の確実性同値 (Certainty equivalent) と呼べる．この確実性同値を表す式が

$$\begin{aligned} T \approx \tau &= E(T)+\frac{1}{2r}\mathrm{Var}(T) \\ &= m+\frac{1}{2r}\sigma^2 \end{aligned}$$

であり，それによれば不確実な所要時間に対する期待効用は，その平均所要時間に分散の一定割合をリスクプレミアムとして加算した確実な所要時間の効用に等しい．この結果，不確実性を伴う期待効用最大化問題は，平均所要時間 $m+$ リスクプレミアム $(1/2r)\sigma^2$ の最大化問題と同値となる．よって，指数結果効用関数と正規分布の組み合わせは M-V 型の線形期待効用関数を与えた分析と同値結果を得る．

参 考 文 献

Arrow, K. (1963). Uncertainty and welfare economics of medical care, *American Economics Review*, **53**, 941-973.

Brastow, W. C. and Jucker, J. V. (1977). Use of a mean-variance criterion for traffic assignment, Department of Industrial Engineering, Stanford University (unpublished manuscript).

Golob, T. F., et al. (1970). *An Analysis of Consumer Preferences for a Public Transportation System*, General Motors Research Laboratory, Warren, Michigan.

Hall, R. W. (1983). Travel outcome and performance; the effect of uncertainty on accessibility, *Transportation Res. Part B*, **17B**, 275-290.

阪神高速道路公団(1993). 平成4年度道路交通情報が経路選択行動に与える影響に関する業務, 阪神高速道路公団.

飯田恭敬, 柳沢吉保, 内田　敬(1991). 通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法, 土木計画学研究論文集, **9**, 93-100.

Jackson, W. B. and Jucker, J. V. (1982). An empirical study of travel time variability and travel choice behavior, *Transportation Sci.*, **4**, 460-475.

黒田勝彦, 山下智志, 加藤裕明(1993). 空港アクセストリップにおける遅刻リスク回避行動に関する研究, 第48回土木学会年次学術講演概要集, **48-4**, 544-545.

MacFadden, D. (1974). *Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior*, Frontiers in Econometrics Academic Press.

Markowitz, H. M. (1952). Portfolio selection, *Journal of Finance*, **7**(1).

Mossin, J. (1968). Optimal multi-period portfolio policies, *Journal of Business*, **41**, 215-229.

岡田良司, 角　知憲, 杉野浩茂, 大枝良直(1990). 交通渋滞に応答する自動車通勤者の出発時刻決定行動モデル, 土木計画学研究講演集, **13**, 351-358.

Pratte, J. (1964). Risk aversion in the small and the large, *Econometrica*, **32**, 122-136.

内田　敬, 飯田恭敬, 松下　晃(1992). 通勤ドライバーの出発時刻決定行動の実証分析, 土木計画学研究論文集, **10**, 39-46.

von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior*, 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

Wong, H. and Sussman, J. (1973). Dynamic travel time estimation on highway networks, *Transportation Research*, **7**.

山下智志 (1995). 交通機関選択問題における定時性評価と遅刻回避行動分析の関係, Research Memo., No. 541, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo.

山下智志, 黒田勝彦(1993). ブートストラップ法によるリスクモデルの安定性に関する研究, 土木計画学研究講演集, **14**(1), 751-758.

山下智志, 黒田勝彦 (1996). 土木学会論文集, **536/4-31**, 59-68.

Utility Function for Travel Demand Analysis under Travel Time Uncertainty

Satosi Yamasita

(The Institute of Statistical Mathematics)

Since 1970's, it has been insisted by many researchers that the consideration of travel time uncertainty is very much influential for the estimation of travelers' behavior. However, none of these researches has succeeded to explain travelers' tendency of delayed risk avoidance consistency in either theoretical or empirical aspect. Two reasons are considered: the first is the lack of consistent investigation of the accuracy of models proposed, and the second is the ambiguous definition of "uncertainty" and "risk of delay".

Under these circumstances, the present paper discusses the inter-relationship of the models proposed in the past, and develops a new utility function to explain the travelers' behavior under travel time uncertainty. It is also demonstrated based on the practical data that the proposed utility function is well defined to estimate both of the modal choise and the route choise behavior of traveler.

Key words: Utility function, disaggregated logit model, traffic demand estimation, travelers' decision making under uncertainty.